

Yanal Yüklere Maruz Kalan Kolonların SAP2000 ile Monotonik ve Histeretik Analizi

Sıla AVĞIN¹, M.Metin KÖSE¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

(Alınış / Received: 2.12.2019, Kabul / Accepted: 05.08.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 25.12.2020)

Anahtar Kelimeler

Zayıf kolon,
Eğilme deformasyonu,
Kesme deformasyonu,
Donatı sıyrılması,
SAP2000,
Histeretik model

Öz: Birçok ülkede betonarme binaların çoğunluğu güncel sismik kodlara göre tasarlanmamıştır. Bu binalar genellikle güçlü zemin hareketleri sırasında hasara ve çökmeye karşı hassastır. Tipik olarak, bu tür binalardaki kolonlar yetersiz ve geniş aralıklı enine donatıya sahip olup gerekli sismik donatı detaylarından yoksundur. Bu binaların deprem hasarı değerlendirilirken gözlemlenen davranışın mukavemet ve deformasyon kapasitesi açısından değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bir kolondaki yanal deformasyonlar eğilme, donatı sıyrılması ve kesme deformasyonları olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Bu deformasyonların her biri için SAP2000 programıyla monotonik ve histeretik tepkileri ayrı modellenmiştir. Öncelikle kolon monotonik modeldeki eğilme, donatı sıyrılması ve kesme deformasyonları için plastik mafsal modeli ile, daha sonra histeretik modelde ise monotonik modelden elde edilen sonuçlar SAP2000 histeretik pivot modelinde kullanılarak modellenmiştir. SAP2000 modellerinden elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, kullanılan modellerin, betonarme kolonların yanal yüklere tepkisini tahmin etmede iyi bir performans sergilediği gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, daha kompleks analiz metodları ile çözülen monotonik ve histeretik kolon yanal deformasyon modellerinin SAP2000 programıyla daha basit halde çözülebildiği gösterilmiştir.

Monotonic and Hysteretic Analysis of Columns Exposed to Lateral Load with SAP2000

Keywords

Weak column,
Flexural deformation,
Shear deformation,
Reinforcement slip,
SAP2000,
Hysteretic Model

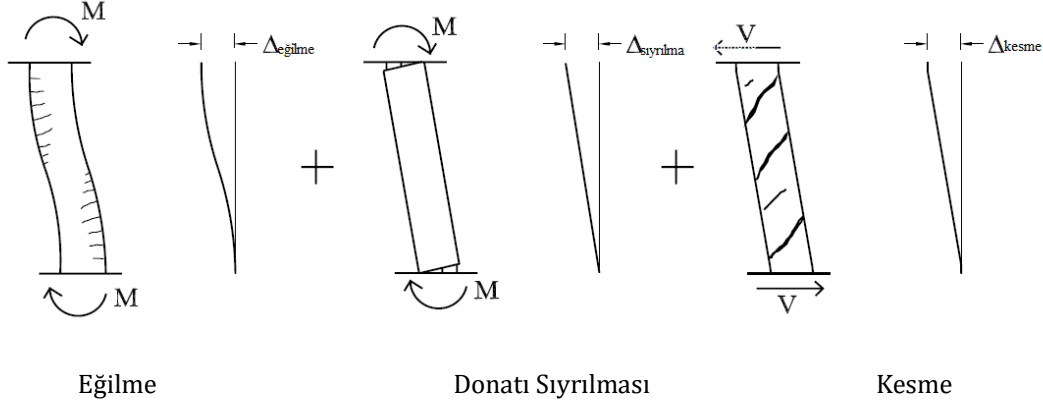
Abstract: Majority of the concrete buildings in many countries are not designed according to the current seismic codes. These buildings are susceptible to damage and collapse during strong earth movements. Typically, the columns in such buildings have inadequate and wide-spaced transverse reinforcement and lack the necessary seismic reinforcement details. The evaluation of the earthquake damage of these buildings requires the evaluation of the observed behaviour in terms of strength and deformation capacity. The lateral deformations in a column consist of three parts: flexural, reinforcement slip and shear deformations. For each of these deformations, monotonic and hysteretic responses were modeled separately by the SAP2000 program. First the column was modeled with plastic hinge model for flexural, reinforcement slip and shear deformations in monotonic model; then in the hysteretic model, the results obtained from the monotonic model was modeled using the hysteretic pivot model in SAP2000. The results obtained from the SAP2000 models have been shown to perform well in predicting the reaction of the reinforced concrete columns to lateral loads compared to the experimental data. According to these results, it has been shown that monotonic and hysteretic column lateral deformation models solved by the more complex analysis methods are simplified by the SAP2000.

İlgili Yazar, email: silaavgin@ksu.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde çoğu ülkede güncel sismik kodlara göre tasarlanmayan çok sayıda betonarme bina bulunmaktadır. Bu yapılar o tarihteki kod ve standartlara göre inşa edilmiş yapılardır. Bugün çoğu ülkede bu yapılar, gereken detaylar olmadan tasarlanmaya ve inşa edilmeye devam etmektedir. Depremler sonrası yapılan araştırmalar,

betonarme bina çökmelerindeki temel nedenin zayıf bir şekilde tasarlanmış betonarme kolonlar olduğunu göstermektedir. Tipik olarak, bu tip yapılarıdaki kolonlar yetersiz ve geniş aralıklı enine donatıya sahip olup gerekli sismik donatı detaylarından yoksundur [1]. Yanal yüklere maruz kalan betonarme kolonların toplam yanal deformasyonu; Şekil 1'de gösterilen kolon ucundaki donatı sıyrılması, kesme ve eğilmeden kaynaklanan deformasyonların toplamıdır. [2]



Şekil 1. Yanal yüklere maruz kalan betonarme kolonların bileşenleri [3]

Donatı çubuğunun sıyrılma davranışını ölçmek için yapılan ilk çalışmalar 1970'li yıllarda ortaya çıkmış ve bugün hala aktif bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Otani ve Sozen [4] modellerinde uygulanan moment ile çelik gerilmesi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu kabul etmiştir. Eligehausen ve ark. [5] California Üniversitesi'nde betona gömülü donatı çubuğunun aderans gerilmesini belirlemek amacıyla deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Bu modelde aderans gerilmesi bölgesel gerilmenin aksine çubuk üzerindeki her noktada sıyrılma ile ilgilidir. Bölgesel sıyrılmanın aderans gerilmesi ile ilgili olduğu bir model kullandığından, sıyrılma modeli karmaşıktır. Bu yüzden bu problem tek aşamada çözümlenemez. Doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için bir tekrarlamaya şeması uygulanabilir. Morita ve Kaku [6] farklı yaklaşım kullanarak ortalama aderans gerilmesini çelik gerilmesi ile orantılı olarak kabul etmiştir. Alsawat ve Saatçioğlu [7] iki kademeli aderans gerilmesi önermişlerdir. Çubuk akmadan önce, sabit elastik aderans gerilmesi, çubuk plastik deformasyonla karşılaştıkça ayrı bir sürtünme aderans gerilmesi kullanmışlardır.

Mevcut betonarme kolonların kesme mukavemetinin değerlendirilmesi için, California Department of Transportation (Caltrans) [8] enine donatı katkısının (V_s) dahil edildiği kesme dayanımını (V_n) hesaplamıştır. Beton katkısı V_c , uygulanan eksenel yük, yer değiştirme sünekliği ve sargılamanın bir fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. FEMA-273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings* [9] kolon kesme dayanımı denklemleri, eksenel yük ve ters çevrimli yanal yer değiştirmelere maruz kalan mevcut kolonlar için mevcut deneysel verilerin gözden geçirilmesine dayanmaktadır. FEMA-273 dökümanlarında, eski kolonlardaki süneklik talepleri basit bir şekilde dikkate alınmaktadır. Sezen [1] kesmede yetersiz olan 4 betonarme kolonu test etmiş ve kuvvet-kesme yer değiştirmesi için parçalı doğrusal bir model önermiştir. Vecchio ve Collins [10] betonarme elemanlarda kesme davranışını iyileştirmek için modifiye basınç alanı teorisini (MCFT) geliştirmiştir. Aslında bu teori levha elemanlar için geliştirilmiş olup daha sonra kiriş ve kolon gibi betonarme elemanlarda ilişkilendirilmiştir.

Sismik ve eksenel yüklere maruz kalan zayıf donatılı betonarme kolonların yanal deformasyon davranışının tahmin edilmesi için, yapısal elemanların mukavemet, rijitlik ve enerji yayılımı özelliklerini içeren uygun histeretik modeller gerekmektedir. Sismik yükleme altındaki betonarme elemanların yanal kuvvet-eğilme deformasyon karakteristiklerini simüle eden, eğilme için çeşitli histeretik modeller üretilmiştir. Clough [11], rijitlik bozulmasını içeren basit bir elasto-plastik histeretik model önermiştir. İki parçalı doğrudan oluşan eğri, birincil zarf görevi görür. Rijitliğin bozulmasını simüle etmek için, yeniden yükleme bölümü bir önceki maksimum tepki noktasını hedeflemektedir. Yeniden yükleme bölümünün eğimi, maksimum tepki arttıkça azalmaktadır. Fukuda [12] rijitliğin çevrimde azalan parçalı doğrudan oluşan eğri modeli önermiştir. Birincil zarf üç parçalı doğrudan oluşan eğridir ve yük boşaltma noktasının ötesindeki tepki iki parçalı doğrudan oluşan bir ilişki izler. İlk inelastik döngü sırasında enerjinin yayılması, sonraki döngülerden daha büyüktür. Imbeault ve Nielsen [13] tarafından her çevrimde rijitliği azalan iki parçadan oluşan histeretik model önerilmiştir. Eğrinin akma sonrası kısmının rijitliğinin, başlangıç yükleme rijitliğinin yüzde üçüne eşit olduğu tanımlanmıştır. Takeda ve ark. [14] sismik harekete maruz kalan betonarme yapıların önemli bir özelliği olan artan hasara bağlı olarak rijitliğin azalmasını göz önünde bulundurarak rijitlik modelinde düzeltmeler önermişlerdir. Birincil eğri, donatı çubuğunun akmasında ve betonun çatlama eğimindeki değişiklik ile üç düzgün segmentle tanımlanmaktadır.

Betonarme elemanların sismik yükleme altındaki yanal kuvvet-sıyrılma deformasyon özelliklerini öngören donatı sıyrılması için çeşitli histeretik modeller mevcuttur. Otani [15], histeretik sıyrılma modeli, iki parçalı doğrudan oluşan birincil zarf kullanmıştır. Otani modeli, histeresiz döngülerinin sıkışmasını içermez. Soleimani [16], donatı sıyrılması deformasyonlarının dönme yayları ile modellendiği histeretik bir model sunmuştur. Moment-donatı sıyrılması dönme ilişkisinin elastik rijitliği, eğilme rijitliğinin üçte biri olarak tanımlanmıştır. Banon, Biggs ve Irvine [17], donatı sıyrılması ve kesmenin birlikte etkisini simüle etmek için histeretik bir model önermişlerdir. Birincil eğri iki parçalı doğrudan oluşmaktadır.

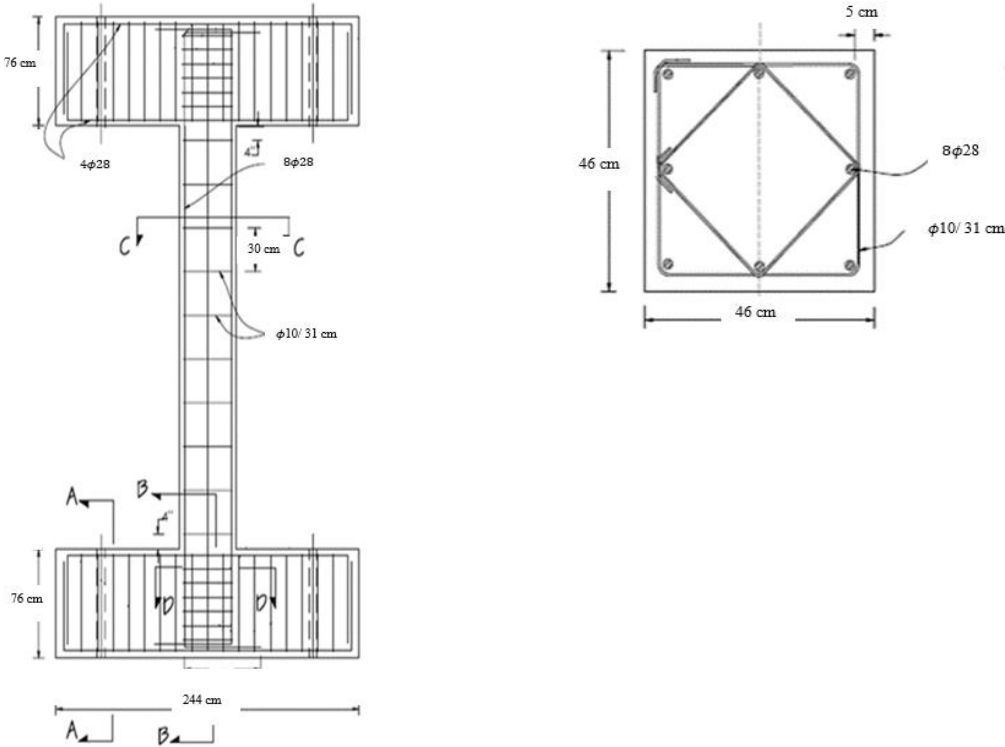
Sismik yükleme altındaki yanal kuvvet-kesme deformasyon özelliklerini öngören çeşitli kesme histerik model çalışılmıştır. Takayanagi ve Schnobrich [18], kesme kuvveti-kesme deformasyon ilişkilerinde daha yaygın olan histeresiz döngülerde sıkışması ve rijitliğin azalması gibi önemli histeretik özellikleri birleştirmenin dahil edildiği bir model önermiştir. Kesme etkisi, moment-dönme ilişkisine dahil edilmiştir.

Bu çalışmada, hafif betonarme kolonların SAP2000 [19] ile toplam yanal deformasyonunu tahmin etmek için monotonik ve histeretik yükler altında eğilme, donatı sıyrılma ve kesme deformasyonları modellenecektir. Bu çalışmada, proje mühendisleri için kullanım kolaylığından dolayı genel amaçlı yapısal analiz programı SAP2000 tercih edilmiştir. İlk olarak, her deformasyon tipi ayrı modellenecek ve zayıf betonarme kolonların yanal deformasyonu her deformasyon tipi için tahmin edilecektir. Daha sonra bu üç model, zayıf betonarme kolonun yanal deformasyonunu tahmin edebilen bir genel model oluşturmak için birleştirilecektir. Elde edilen monotonik tepkiler histeretik tepkilerin modellenmesinde kullanılacaktır.

2. Model Doğrulaması için Seçilen Deneysel Çalışma

2.1. Numune Tanımları ve Malzeme Özellikleri

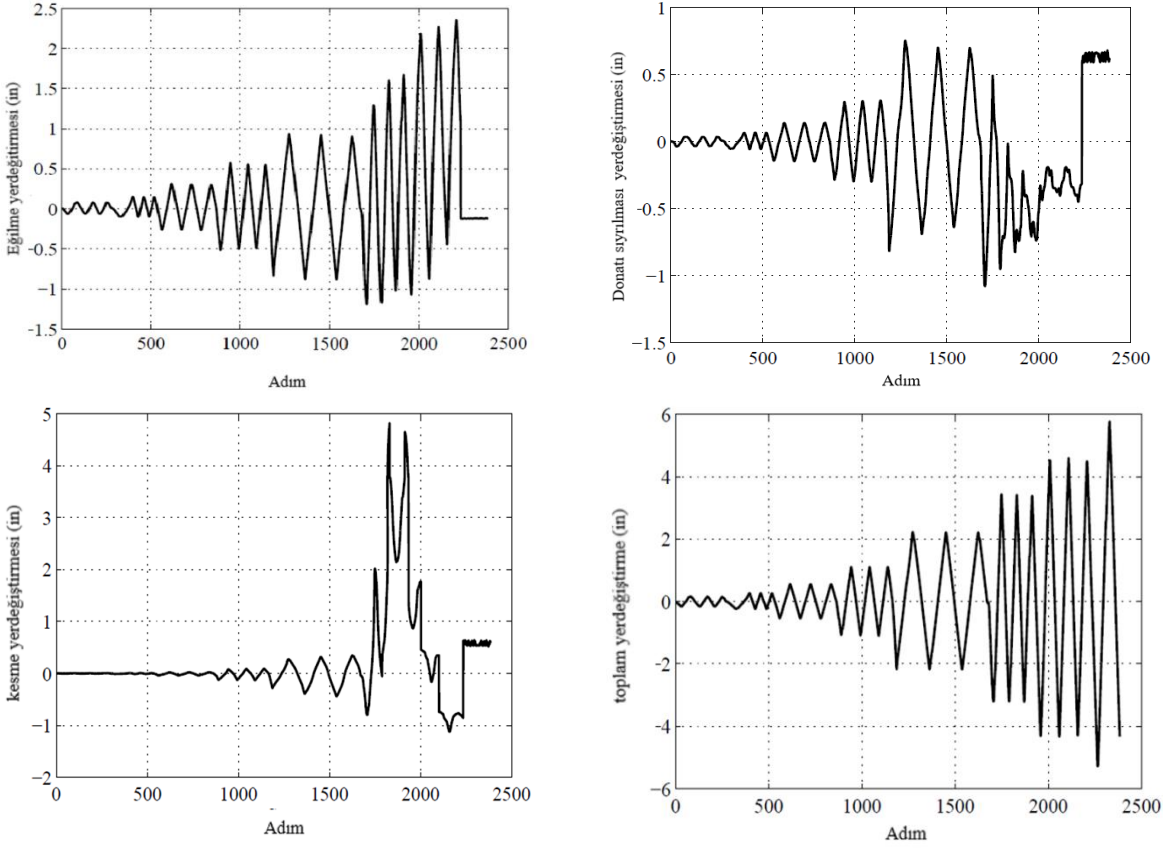
Modellemede kullanılacak deneysel veriler Sezen [1] tarafından yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Test numunesi yüksekliği ve tipik kolon kesiti Şekil 2'de gösterilmektedir. Kolon 46 cm*46 cm kesitlerde ve kolon yüksekliği 295 cm boyutlarındadır. 8 adet $\phi 28$ boyuna donatı kullanılmıştır. Boyuna donatıların ortalama akma dayanımı ve nihai dayanımı sırasıyla 434 MPa ve 645 MPa'dır. $\phi 10$ enine donatıların ölçülen akma dayanımı ve nihai dayanımı sırasıyla 476 MPa ve 724 MPa'dır. Enine donatı 31 cm eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Kolon ve kirişler için boyuna donatı üzerinden 5 cm pas payı bulunmaktadır. Kolon boyuna çubukları kirişlerin üst ve alt kısımlarında 90° eğilmiştir. Betonun 28 günlük belirlenen basınç dayanımı 21 MPa'dır. [1]



Şekil 2. Test numunesi yüksekliği, tipik kolon kesiti ve test kurulumu [1]

2.2. Yükleme Davranışları

Test kolonu $0.15f'_cA_g$ (f'_c = Ölçülen beton basınç gerilmesi, A_g : brüt kesit alanı) değerine eşit olan 667 kN sabit bir basınç eksenel yüke ve Şekil 3'te gösterildiği gibi eğilme, donatı sıyrılması, kesme ve toplam standart yanal yer değiştirme yüklemesine sahiptir. [20]

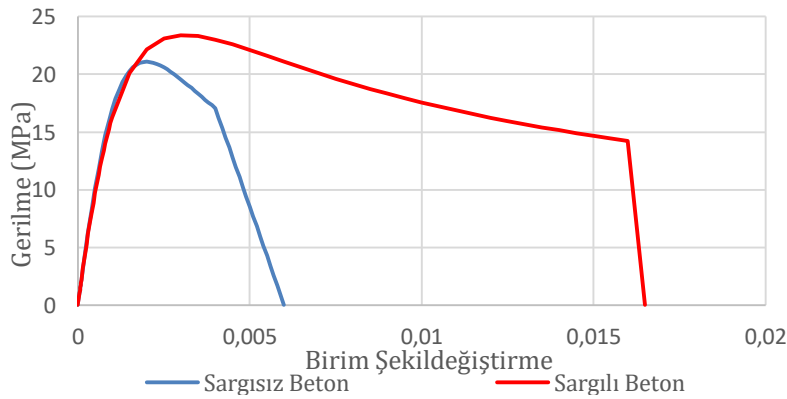


Şekil 3. Yanal yerdeğiştirme yüklemeleri [20]

3. Malzeme

3.1. Beton Modelleri

Mander ve ark. 1988 yılında hem spiral hem de dikdörtgen enine donatılı kesitlere uygulanabilen bir model önermişlerdir. Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, enine donatı ile sarılması durumunda, sarılmamış duruma göre önemli farklılıklar gösterdiğinden dolayı, beton sargılı ve sargısız olmak üzere 2 farklı kategoride incelenecektir. Mander ve diğ. (1988) tarafından sargılı beton için geliştirilen gerilme-birim şekil değiştirme modelinde, sargı etkisi ihmal edilirse, model sargısız model içinde kullanılmaktadır. [21] Bu çalışmada Şekil 4'te gösterildiği gibi sargılı ve sargısız beton için Mander Beton Modeli kullanılmıştır.

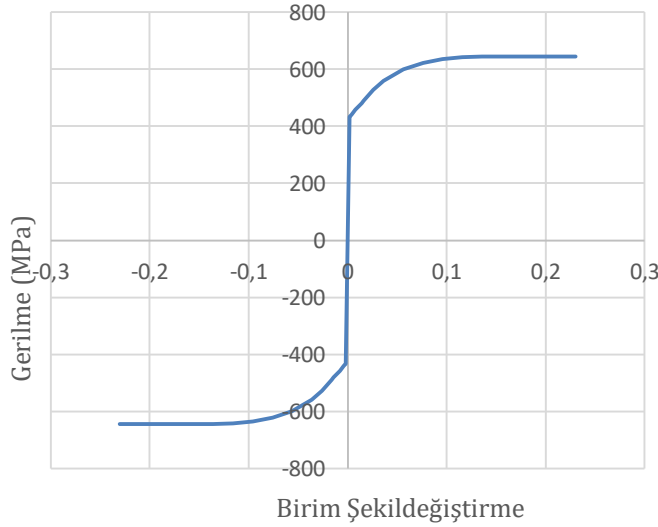


Şekil 4. Mander Beton Modeli

3.2. Çelik Modeli

Donatı çeliğinin davranışı, elastik davranış, akma platosu ve doğrusal olmayan birim şekil değiştirme-pekleşme bölgesi olmak üzere üç bölge tanımlanarak modellenmiştir (Şekil 5). Sezen tarafından test edilen kolonlar için, boyuna çelik gerilme-birim şekil değiştirme modelini tanımlamak için aşağıdaki parametreler kullanılmıştır:

$$\begin{aligned} f_y &= 63 \text{ ksi (434 MPa)} & \varepsilon_{sh} &= 0.016 \\ f_u &= 93.5 \text{ ksi (645 MPa)} & \varepsilon_u &= 0.23 \\ E_s &= 29000 \text{ ksi (2*10}^5 \text{ MPa)} & a &= 0.02 \end{aligned}$$



Şekil 5. Çelik modeli

4. Deformasyon Bileşenleri

4.1. Monotonik Davranışın Deformasyon Modelleri

4.1.1. Eğilme Deformasyonu

Bir betonarme kesitin eğilme tepkisi, moment-eğrilik analizi ile hesaplanabilir. Moment-eğrilik analizi, her malzemenin doğrusal olmayan davranışı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisini elde edebilmek için SAP2000 programının Section Designer modülü kullanılmıştır. Eğilme deformasyonlarından kaynaklanan kolonun yanıl yer değiştirmesi, eğrilik dağılımının kolonun yüksekliği boyunca integrali alınarak hesaplanabilir:

$$\Delta_f = \int_0^L \phi(x) x dx \quad (1)$$

burada $\phi(x)$ = eğrilik dağılımı, x kolon eksenini boyunca ölçülür ve L= kolon yüksekliğidir. Denklem 1, boyuna çelikte başlangıç akmasına kadar yanıl yükler için eğilme deformasyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Akma meydana geldikten sonra, eğilme deformasyonları bir plastik mafsalsal modelinden hesaplanır:

$$\Delta_f = \Delta_{f,y} + (\phi - \phi_y) L_p \left(\alpha - \frac{L_p}{2} \right) \quad (2)$$

burada $\Delta_{f,y}$ = Denklem 1'de integrasyon methodu kullanılarak hesaplanan akma anındaki eğilme deformasyonu,

ϕ = kolon ucundaki eğrilik ve ϕ_y = akma anındaki eğrilik, α = kesme açıklığıdır ve her iki ucu ankastre bir kolon için $L/2$ 'ye eşittir [22]. Plastik mafsallık uzunluğu L_p , Moehle'nin önerileri doğrultusunda toplam kesit derinliğinin yarısı olarak alınmıştır. [23]

4.1.2. Donatı Sıyrılması Deformasyonu

Betonarme bir kolon, eğilme momentine maruz kaldığında gerilme, çekme donatı çubuklarının beton içerisindeki uzunluk boyunca birikir. Bu, çubukların kolon sabit uçlarında ankraj betonuna göre uzamasına veya kaymasına neden olur. Bu uzama genellikle donatı sıyrılması olarak bilinir ve Şekil 1' de gösterildiği gibi kolonun rijit-cisim dönmesine yol açar. [3]

Bu çalışmadaki model için, aderans gerilmesi elastik çelik davranışı için bir değere ve akma gerilmesinden daha büyük çelik gerilmeler için bir değer olan iki-kademeli fonksiyon olarak tahmin edilmiştir. Elastik aralıktaki aderans gerilmesinin değeri, $u_b = \sqrt{f'_c}$, elastik olmayan aralık için $u'_b = 0.5\sqrt{f'_c}$ olarak alınmıştır [22]. Donatı çubuğunun yüklü ucundaki sıyrılma, iki-kademeli şekildeğiştirme dağılımının, geliştirme uzunluğu boyunca integrali alınarak donatı sıyrılması hesaplandığında;

$$sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (3)$$

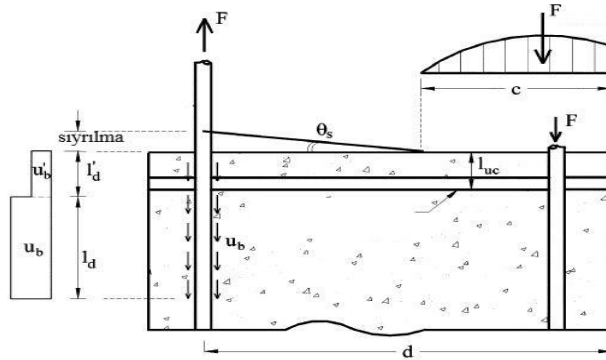
$$sıyrılma = \frac{\varepsilon_y l_d}{2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_y) l_d}{2} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (4)$$

burada $l_d = f_s d_b / 4u_b$ ve $l'_d = (f_s - f_y) d_b / 4u'_b$ sırasıyla çubuğun elastik ve elastik olmayan kısmı için gelişme uzunluklarıdır. f_s = çubuğun yüklü ucunda gerilme, f_y = çelik akma gerilmesi, d_b = boyuna donatı çapı, ε_s = çubuğun yüklü ucundaki şekildeğiştirme, ε_y = çelik akma şekildeğiştirmesidir. Donatı sıyrılmasından kaynaklanan dönme, Şekil 6'dan hesaplanabilir.

$$\theta_s = \frac{sıyrılma}{d - c} \quad (5)$$

burada d ve c = çekme çeliğinin ve nötr eksenin asal kompresyon lifinden merkeze olan mesafeleridir. Bir konsol kolonunun serbest ucundaki donatı sıyrılmasından kaynaklanan yanal yerdeğiştirme, sıyrılma dönmesi θ_s ve kolon uzunluğundan L hesaplanabilir: [24]

$$\Delta_s = \theta_s L \quad (6)$$



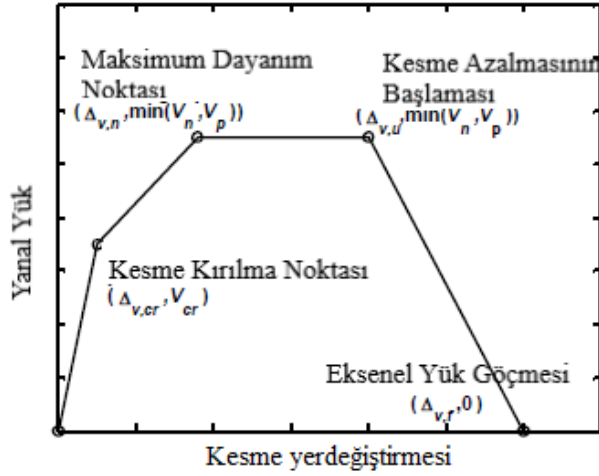
Şekil 6. Donatı sıyrılmasından kaynaklanan dönme [23]

4.1.3. Kesme Deformasyonu

Betonarme elemanlardaki kesme deformasyonları, tasarım ve araştırmalarda geleneksel olarak göz ardı edilmişlerdir. Aksine, daha sıkı sismik tasarım hükümlerine göre tasarlanmamış bir betonarme kolon için, kesme davranışı göçme kriteri olabilir. Bu tür kritik betonarme kolondaki kesme deformasyonları, toplam

deformasyona oranla büyük bir yüzdeye sahiptir ve bu nedenle deformasyon kapasitesinin doğru bir analizi gerektiğinde göz ardı edilemez [1].

Bu çalışmada kullanılan kesme modeli, Patwardhan [25] tarafından geliştirilen modeldir. Patwardhan, yanal kuvvet-kesme deformasyon tepkisindeki kilit noktaları tanımlayan denklemler kullanarak parametrik bir çalışma ile tanımlanmış ve bu noktalar modeli tanımlamıştır. (Şekil 7)



Şekil 7. Patwardhan tarafından önerilen yanal yük-kesme modeli

Bu çalışmada ilk nokta kesme kırılma noktasıdır. Patwardhan regresyon analizi sonuçları kullanarak, kesme kırılma dayanım denklemi önermiştir:

$$V_{cr} = \Delta_{v,cr} * \frac{GA_g}{L} \quad \Delta_{v,cr} = \left(\frac{P}{50000} + 0.0062 \right) \quad (7)$$

burada G = betonun kesme modülü, P = eksenel yük, A_g = brut kesit alanı ve L = kolon yüksekliğidir. İkinci nokta maximum gerilme noktasıdır ve kesme gerilmesine etki eden beton ve çelik kesme bileşenlerinin toplamı ile elde edilir:

$$V_n = k(V_c + V_s) \quad (8)$$

$$= \left(\frac{0.5\sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5\sqrt{f'_c}A_g}} \right) 0.8A_g + \left(\frac{A_{sp}f_{yw}d_c}{s} \right)$$

burada V_s = kesmede enine donatı katkısı, V_c = kesmede beton katkısı, f'_c = beton basınç dayanımı, a = kesme açıklığı, d = etkili derinliği, A_{sp} = yük yönünde enine donatının alanı, f_{yw} = enine donatının akma gerilmesi ve s = enine donatılar arasındaki farktır.

Gerin ve Adebar kesme dayanım azalmasını başladığı bir nokta tanımlar [26]. Ancak, onların modelleri, akma ve kesme şekildeğiştirmesi sünekliğinde teorik bir kesme yerdeğiştirmesine dayanmaktadır. Nihai kesme şekildeğiştirmesi, γ_u ve $\Delta_{v,u}$ Denklem 9 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\gamma_u = \left(4 - 12 \frac{v_n}{f'_c} \right) \gamma_n \quad \Delta_{v,u} = \gamma_u L \quad (9)$$

burada; v_n = tepe mukavemetindeki kesme gerilmesidir (V_{peak}/bd).

Patwardhan modelindeki kesme dayanım azalması başlangıcından sonra, kesme dayanımı, eksenel yük göçmesi noktasına artan kesme deformasyonu ile lineer olarak azalır. Eksenel yük göçmesinde yanal kuvvetin sıfır olduğu varsayılır. Eksenel yük göçmesindeki kesme deplasmanı şu şekilde hesaplanır :

$$\Delta_{v,f} = \Delta_{ALF} - \Delta_{f,f} - \Delta_{s,f} \geq \Delta_{v,u} \quad (10)$$

burada Δ_{ALF} = eksenel yük göçmesindeki toplam yerdeğiştirme, $\Delta_{f,f}$ ve $\Delta_{s,f}$ sırasıyla eksenel yük göçme noktasındaki, eğilme ve sıyrılma yerdeğiştirmeleridir. Eksenel yük göçmesindeki toplam sapma, Elwood ve Moehle [27] tarafından önerilen eksenel kapasite modelinden hesaplanır:

$$\Delta_{ALF} = \frac{4}{100} \left[\frac{1 + \tan^2 \theta}{\tan \theta + P \left(\frac{s}{A_{sp} f_{yw} d_c \tan \theta} \right)} \right] \quad (11)$$

burada θ = kesme kırılma açısı ve bu açının 65 derece olduğu kabul edilir.

4.1.4. Toplam Deformasyon

Yanal yüklemeye maruz kalan bir kolonun tepkisini modellemek için, üç deformasyon bileşeninin hepsi, birbirine bağlı olduklarından dolayı toplam yanal deformasyonu tahmin etmek için birleştirilmelidir. Tepe öncesi tepkisi için, toplam deformasyonun tahmin edilmesi amacıyla eğilme, donatı sıyrılması ve kesme deformasyonların basitçe eklenebileceği varsayılmaktadır. Bu basit kombinasyon, kolonun maksimum gücüne ulaşılan kadar devam eder. Tepe sonrası davranışlarda kolon; kesme, akma ve eğilme mukavemetinin karşılaştırılmasına dayanan beş kategoriden birinde sınıflandırılır ve her bir kategori için deformasyon bileşenleri belirlenen kurallara göre kombinasyon yapılır.

Kolonların sınıflandırılması, kesme dayanımının (V_n), akma dayanımının (V_y) ve kolonların eğilme mukavemetinin (V_p) karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Akma mukavemeti V_y , kolondaki çekme çubuklarının ilk akmasına karşılık gelen yanal yüküdür. Eğilme mukavemeti V_p , eğilme analizi sırasında hesaplanan tepe momentine karşılık gelen yanal yük olup kesme dayanımı V_n ise Sezen ve Moehle [2] tarafından önerilen bir denklemden hesaplanır.

➤ Kategori-1 ($V_n < V_y$)

Kolonun kesme mukavemeti, akma mukavemetinden daha azdır ve kolon eğilme davranışında elastik kalırken, kesmeden kaynaklı olarak göçer.

➤ Kategori-2 ($V_y \leq V_n \leq 0.95V_p$)

Kesme kuvveti, eğilme mukavemetinden daha azdır ve kolon kesmede zayıftır, ancak kesme göçmesinden önce ortaya çıkan elastik olmayan eğilme deformasyonu, tepe sonrası davranışı etkiler.

➤ Kategori-3 ($0.95V_p \leq V_n \leq 1.05V_p$)

Kolonun kesme ve eğilme dayanımları esas olarak özdeştir. Kesme ve eğilme göçmesinin eşzamanlı olarak gerçekleştiği varsayılır ve her iki mekanizma da tepe sonrası davranışa katkıda bulunur.

➤ Kategori-4 ($1.05V_p < V_n \leq 1.4V_p$)

Kesme mukavemeti eğilme mukavemetinden daha büyüktür ve kolon eğilme sırasında göçebilir, ancak büyük kesme deformasyonları tepe sonrası davranışı etkiler ve yer değiştirmeler arttıkça kesme göçmesi meydana gelebilir.

➤ Kategori-5 ($V_n > 1.4V_p$)

Kesme dayanımı eğilme dayanımından çok daha büyüktür ve kolon kesme davranışında elastik kalırken, eğilmeden kaynaklı olarak göçer.

Kategori-1 kolonları için, Denklem 10'da kullanılacak $\Delta_{f,f}$ ve $\Delta_{s,f}$ değerleri sıfır kabul edilir. Kategori-2 kolonları için, kesme mukavemeti eğilme mukavemetinden daha azdır ve bu değerler, kolonda kesme mukavemetine eşit yükte eğilme ve sıyrılma deformasyonları olarak alınır. Kategori 3, 4 ve 5 için, $\Delta_{f,f}$ ve $\Delta_{s,f}$ hesaplanan maksimum eğilme ve sıyrılma deformasyonlarıdır. [27]

4.2 Histeretik Davranışın Deformasyon Bileşenleri

4.2.1 Histeretik Eğilme Deformasyonu

Eğilme deformasyonları, betonarme elemanlarda en iyi anlaşılabilir ve en kolay modellenebilen deformasyonlardır. Bir betonarme elemanın eğilme-dominant tepkisi genellikle kararlı histeresiz döngüleri ile sonuçlanır ve büyük bir enerji emme kapasitesi ile arzu edilen bir sünek davranış gösterir. Yeniden yükleme sırasında rijitliğin

bozulması küçüktür ve bu da şişman histeresiz döngülerine neden olur. Ayrıca, histeresiz döngülerin deformasyon aralıkları dahilinde neredeyse herhangi bir bozulma olmaksızın monotonik yük kapasitesine ulaşmaktadır. [20]

4.2.2. Histeretik Donatı Sıyırılması Deformasyonu

Yanal yükler altındaki kolonlarda çevrimsel donatı sıyırılması deformasyonlarını doğru bir şekilde tahmin edecek bir hesaplama açısından verimli histeretik modelin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Donatı sıyırılması ve ilgili deformasyonlar birçok farklı yoldan kaynaklanmaktadır. Tepkinin özellikleri, donatı çubuğu niteliği ve uzunluğu üzerine dayanmaktadır. Betonarme elemanların histeretik halkaları genellikle yeniden yükleme sırasında eğimde belirgin bir değişiklik göstermektedir. [20]

4.2.3. Histeretik Kesme Deformasyonu

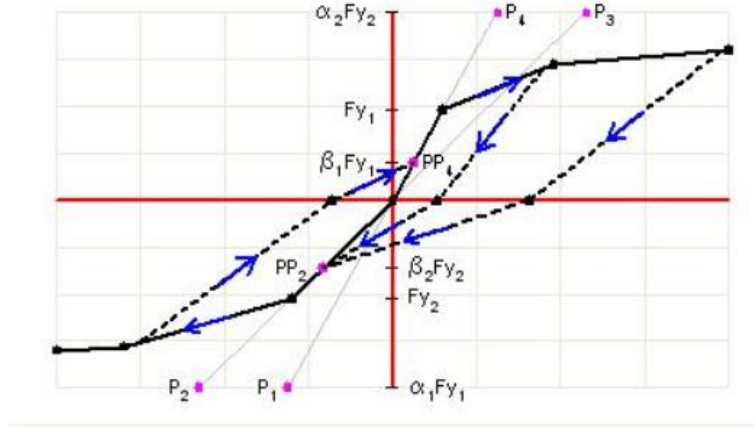
Kesme deformasyonları betonarme yapıların sismik tepki analizinde toplam deformasyonun yüzde onundan daha azını oluşturduğu için genel olarak gözardı edilmiştir. Ancak, kesme deformasyonları, kesmede kritik kolonlar için büyüktür ve sismik yükler altındaki kolonların histeretik davranışının doğru bir tahmini isteniyorsa, göz ardı edilemez.

Kesme kuvveti-kesme deformasyon ilişkisi, histeresiz döngülerinin belirgin bir şekilde sıkışmasını göstermektedir. Betonarmenin karakteristik özelliği, nispeten yüksek elastik olmayan kesme deformasyon döngüleri seviyelerinde rijitlik bozulumu sergilemektedir. Deformasyon döngülerinin sayısı arttıkça veya kesme deformasyonunun büyüklüğü arttıkça, betonarme eleman yeniden yükleme sırasında daha yumuşak hale gelir. Ayrıca, kesme kritik kolonlar tersinir yükleme altında artan mukavemet kaybı sergiler. Mukavemet azalma derecesi, beton sargılaması, kesme kuvveti, yükleme geçmişi ve eksenel yük seviyesi gibi birçok parametreye bağlıdır. Erken ve hızlı mukavemet azalması, büyük eksenel basınç varlığında yapısal tepki üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olabilir. [20]

4.2.4. Pivot Histeretik Model

Bu model, betonarme elemanlar için çok uygundur. Boşaltma ve geri yükleme işlemlerinin, hareket-deformasyon düzleminde pivot noktaları olarak adlandırılan belirli noktalara doğru yönelme eğilimine dayanmaktadır (Şekil 8). Bu modelin en yaygın kullanımı moment-dönme içindir. Bu model tam olarak Dowell, Seible ve Wilson'da (1998) açıklanmıştır. Pivot modeli için aşağıdaki ek parametreler belirtilmiştir:

- α_1 , Pozitif kuvvetten boşaltma için dönme noktasını sıfırlayan bir değerdir. Boşaltma pozitif elastik çizginin uzantısındaki bir noktada meydana gelir.
- α_2 , Negatif kuvvetten boşaltma için dönme noktasını sıfırlayan bir değerdir. Boşaltma negatif elastik çizginin uzantısındaki bir noktada meydana gelir.
- β_1 , pozitif kuvvete doğru sıfırdan ters yükleme için pivot noktası bulur. Yeniden yükleme, pozitif elastik çizgi üzerindeki bir noktaya doğru, pozitif akma kuvvetinin β_1 katı kuvvet değerinde, $0.0 < \beta_1 \leq 1.0$ olduğu bir noktaya doğru gerçekleşir.
- β_2 , negatif kuvvete doğru sıfırdan ters yükleme için pivot noktası bulur. Yeniden yükleme, pozitif elastik çizgi üzerindeki bir noktaya doğru, pozitif akma kuvvetinin β_2 katı kuvvet değerinde, $0.0 < \beta_2 \leq 1.0$ olduğu bir noktaya doğru gerçekleşir.
- η , plastik deformasyondan sonra elastik eğrilerin azalma miktarını belirleyen değerdir. Burada $0.0 < \eta < 1.0$. Bu parametreler ve davranış şekillerde gösterilmiştir. [28]



Şekil 8. SAP2000 multilinear plastik-pivot modeli [28]

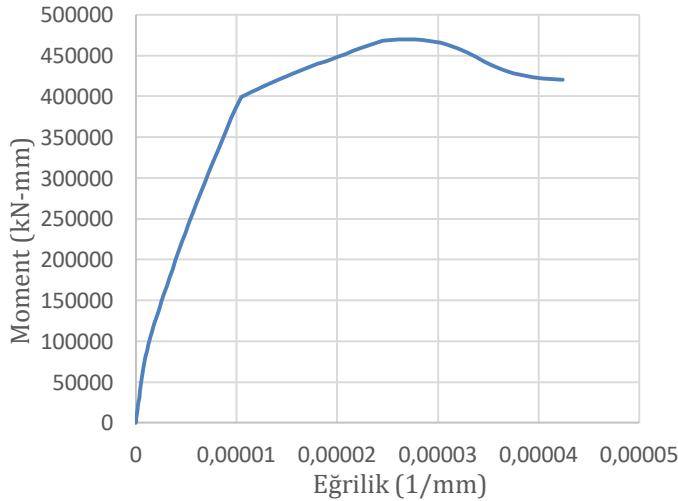
4.2.5. Histeretik Toplam Deformasyon

Yanal yükler altında hafif betonarme kolonların eğilme, donatı sıyrılması ve kesme davranışını ayrı simüle etmek için önerilen histeretik modeller verilmiştir. Her histeretik tepki bileşeni analitik olarak çalışılmış ve SAP2000 programı ile modellenmiştir. Ancak betonarme yapıların doğrusal olmayan dinamik analizi için, her üç deformasyon bileşenini bir araya getirecek ve bu bileşenler arasındaki etkileşimi de hesaba katacak bir kombine model oluşturulmuştur.

5. Analiz Sonuçları

5.1 Moment-Eğrilik Grafiği

Kolonların doğrusal olmayan malzeme modellerinin oluşturulmasında ve moment-eğrilik grafiğinin elde edilmesinde SAP2000 "Section Designer" ara yüzü kullanılmıştır. Elde edilen grafik Şekil 9'da gösterilmektedir.

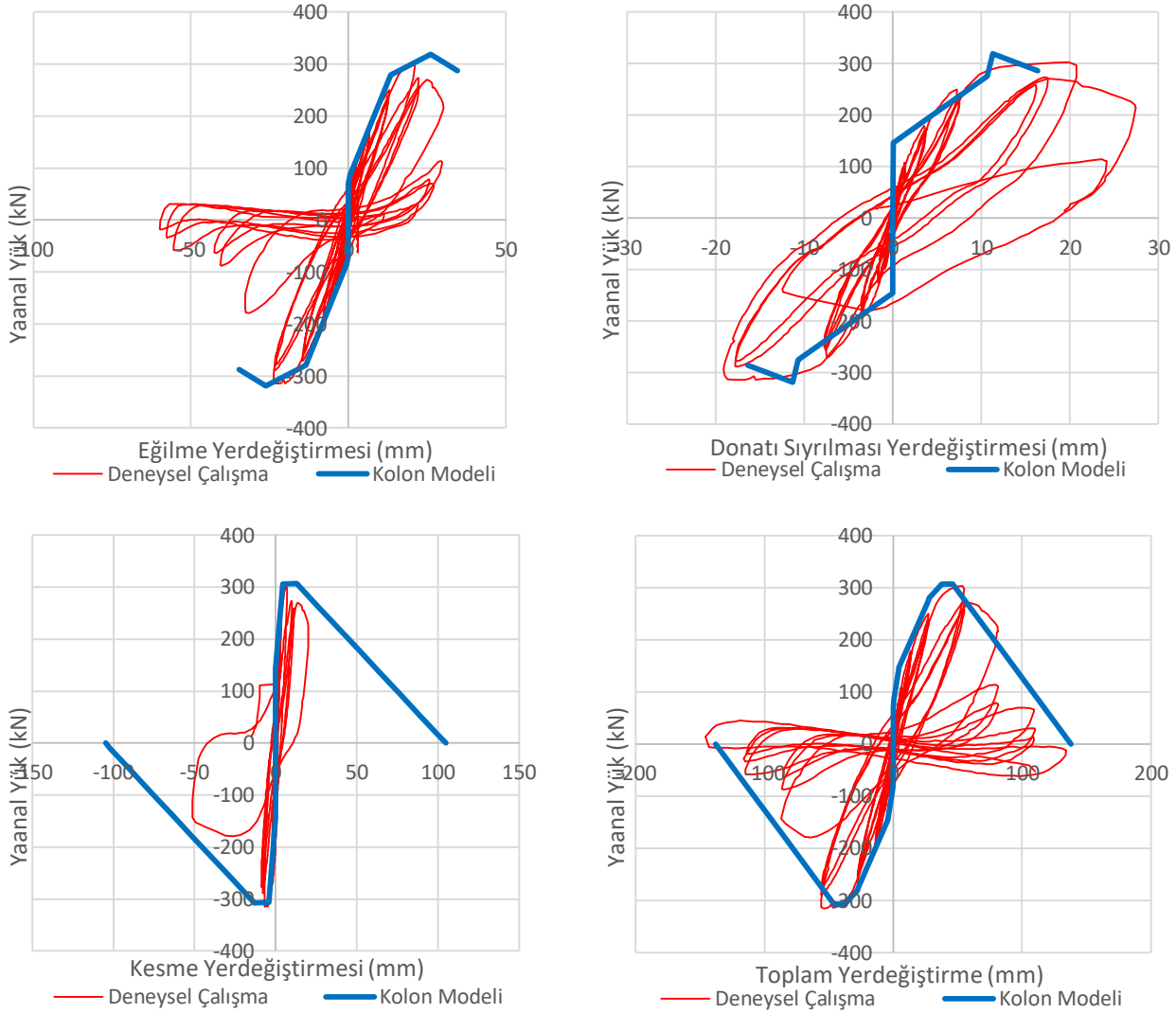


Şekil 8. SAP2000'den elde edilen moment-curvature eğrisi

5.2 Monotonik Deformasyon Sonuçları

Monotonik deformasyon SAP2000'de moment-eğrilik ve moment-dönme grafikleri kullanılarak plastik mafsallarla modellenmiştir. Deformasyon modellerinin davranışı için 4.1.4'te anlatılan kurallar neticesinde gereken hesaplamalar yapılarak kategori belirlenmiştir. Kategori seçimi için yapılan hesaplamalarda seçilen kolonun 4.1.4'te bahsedilen Kategori 3 ($0.95V_p \leq V_n \leq 1.05V_p$) için uygun olduğu görülmüştür. Eğilme deformasyonunda plastik şekil değiştirmelerin tüm kolon boyunca olduğu düşünülerek plastik mafsallar tüm kolon boyunun her %10'luk kısmına yerleştirilmiştir. Donatı sıyrılması deformasyonun plastik şekil değiştirmelerin sadece uç noktalarda olduğu düşünülerek plastik mafsallar kolonun alt ve üst noktalarına yerleştirilmiştir. Kesme deformasyonunun plastik şekil değiştirmelerin sadece uç noktalarda olduğu düşünülerek plastik mafsallar kolonun alt ve üst noktalarına yerleştirilmiştir. Toplam deformasyonu modelleyebilmek için

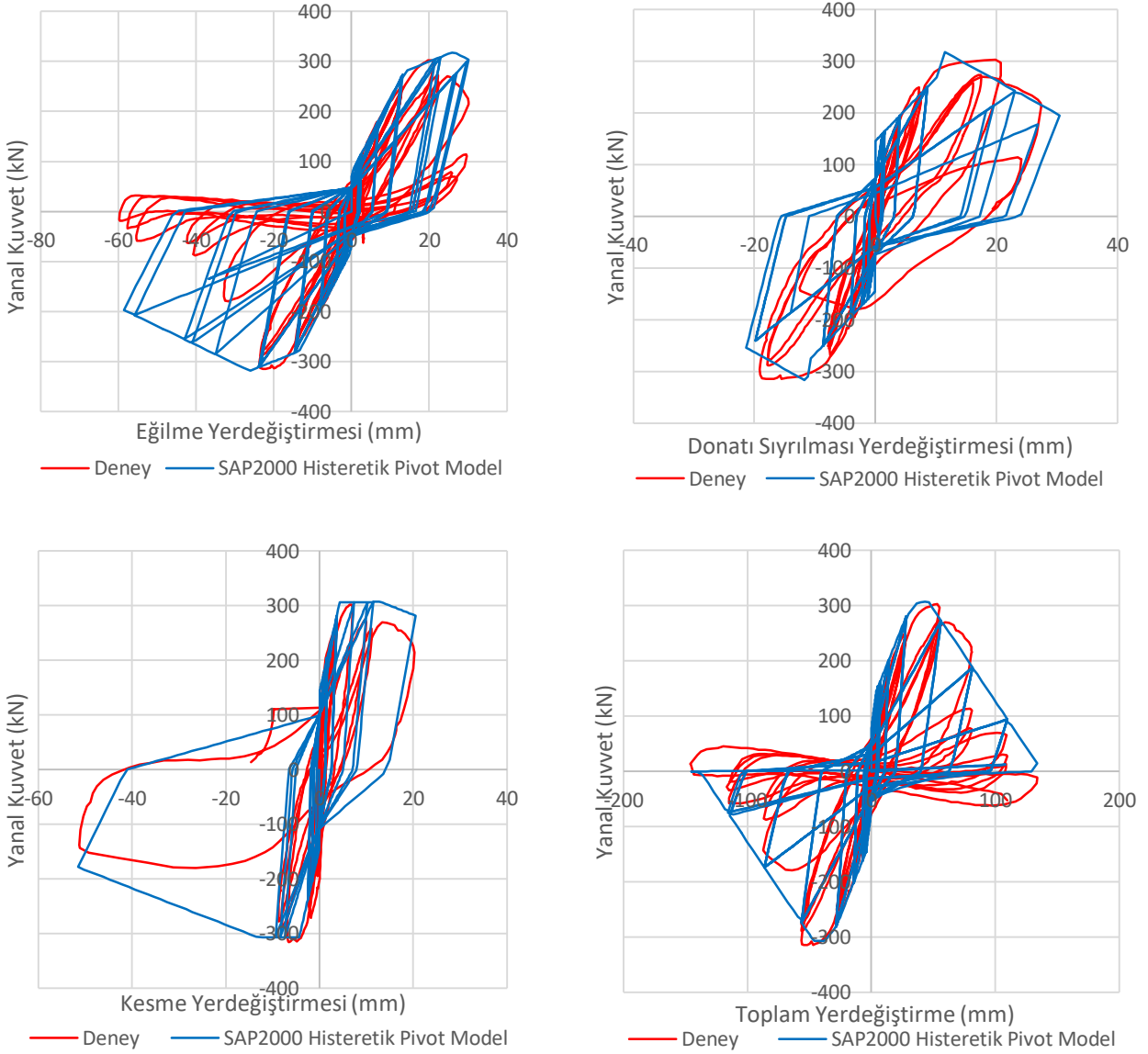
eğilme, donatı sıyrılması ve kesme deformasyonlarının moment-eğrilik ve moment-dönme değerleri gereken noktalara yerleştirilmiştir. Kolonların monotonik deformasyonlarını belirlemek amacıyla statik itme analizi uygulanmıştır. Kolonların monotonik eğilme, donatı sıyrılması, kesme ve toplam yerdeğiştirme sonuçları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Monotonik deformasyon sonuçları

5.3 Histeretik Deformasyon Sonuçları

Histeretik deformasyon elde edebilmek için SAP2000'de pivot histeretik model kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, her kolon için ATC-24'e [29] göre yükleme protokolü uygulanmış ve Şekil 3'te gösterildiği gibi kolonlar için yerdeğiştirme geçmişi olarak kullanılmıştır. Her deformasyon bileşeni için monotonik modelden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Analiz için link eleman kullanılıp 'multilinear plastic' seçilerek histeretik pivot modeli oluşturulmuştur. Kolonların histeretik deformasyonlarını belirlemek amacıyla dinamik analiz uygulanmıştır. Kolonların histeretik eğilme, donatı sıyrılması, kesme ve toplam yerdeğiştirme sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Histeretik deformasyon sonuçları

6. Sonuçlar ve Tartışma

Yanal yükler altında betonarme kolonların testleri, toplam deformasyonun eğilme, donatı sıyırılması ve kesme deformasyonlarından oluştuğunu göstermiştir. Bu çalışmada her deformasyon modelinin monotonik tepkisi için kuvvet-yerdeğiştirme modelleri kullanılmıştır. Kolonların mukavemet, rijitlik ve enerji yayma özelliklerini içeren her deformasyon bileşeni için histeretik modeller de geliştirilmiştir. Üç bileşenli modeller daha sonra betonarme betonun toplam yanal davranışını doğru şekilde simüle edebilen genel bir monotonik ve histeretik model oluşturmak için 4.1.4'te belirtilen kurallar çerçevesinde birleştirilmiştir.

Sezen [1] tarafından test edilen kolon SAP2000 programında modellenmiş ve monotonik ve histeretik analizler yapılmıştır. Monotonik eğilme analizi için moment-eğrilik kullanılarak plastik mafsallar oluşturulmuş ve kolon boyunun onda biri aralıkları ile yerleştirilmiştir. Monotonik donatı sıyırılması analizi için Sezen [1] tarafından geliştirilen modele göre plastik mafsallar oluşturulmuş ve kolonların uçlarına yerleştirilmiştir. Monotonik kesme analizi için Patwardhan [25] tarafından geliştirilen modele göre plastik mafsallar oluşturulmuş ve kolonların uçlarına yerleştirilmiştir. Betonarme bir kolonun toplam yanal deformasyonu, eğilme, donatı sıyırılması ve kesme deformasyonlarının toplamı olduğundan, toplam yanal deformasyonları tahmin etmek için kolonda aynı anda eğilme, donatı sıyırılması ve kesme modeli kullanılmıştır.

Eğilme, donatı sıyırılması, kesme ve toplam tepkiler için histeretik modeller, SAP2000 histeretik pivot modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Kolonun karşılık gelen monotonik tepkilerinden eğilme, donatı sıyırılması, kesme ve toplam deformasyonun dögüsel kuvvet-yer değiştirme ilişkisi elde edilmiştir. Bu dögüsel kuvvet-yer

değiştirme ilişkileri, ilgili histeretik analiz için birincil omurga eğrisi olarak görev yapmıştır. Bir betonarme elemanın eğilme tepkisi, genellikle stabil histerezis döngüsü ile sonuçlanır ve büyük bir enerji emme kapasitesine sahip istenen bir sünek davranışı sergiler. Donatı sıyırılması deformasyonunun histeretik davranışı, genel olarak histerezis halkalarının sıkıştırılması ile karakterize edilir. Kesme kuvvetinin kesme deformasyon ilişkilerinde sıkıştırma ve histeretik halkaların kuvvet azaltması daha yaygındır.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Basit ve genel amaçlı bir program olan SAP2000 programı ile karmaşık, zaman alıcı kesme, donatı sıyırılması ve toplam deformasyon modellerinin geliştirilebileceği gösterilmiştir.
- SAP2000 tarafından geliştirilen monotonik ve histeretik eğilme, donatı sıyırılması, kesme ve toplam deformasyon modelleri, kolon için deneysel monotonik ve döngüsel eğilme, donatı sıyırılması, kesme ve toplam yanal yerdeğiştirmeleri iyi bir şekilde tahmin etmektedir.
- Araştırma, düşük donatı kolonlarının sismik yük altındaki davranışlarının modellenmesine odaklanmış olsa da, eğilme, kesme ve donatı sıyırılması için uygun plastik mafsallar kullanılarak her türlü betonarme kolonun yatay yük altındaki yanal deplasmanları tahmin edilebilir.
- SAP2000'den gösterilen bu yöntem ile, mühendisler akademik programlara ihtiyaç duymadan kesme ve sıyırma deformasyonlarını modelleyerek bina performans analizlerini basitçe yapabileceklerdir.

Kaynakça

- [1] Sezen, H., 2002. "Seismic Behavior and Modeling of Reinforced Concrete Building Columns," Ph.D. Dissertation. University of California, Berkeley, 2002. 324 pp.
- [2] Sezen, H. and Moehle, J. P., 2004. "Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns," Journal of Structural Engineering. ASCE, V. 130, No. 11, Nov. 2004. pp. 1692-1703.
- [3] Lodhi, M.S. and Sezen, H., 2012. "Estimation of Monotonic Behavior of Reinforced Concrete Columns Considering Shear-Flexure-Axial Load Interaction," Earthquake Engineering and Structural Dynamics J., Vol. 41, No. 15, pp. 2159-2175.
- [4] Otani, S. and Sozen, M. A., 1972. "Behavior of Multistory Reinforced Concrete Frames during Earthquakes," Structural Research Series No. 392. University of Illinois, Urbana, 1972. 551 pp.
- [5] Eligehausen, R., Popov, E. P., and Bertero, V. V., 1983. "Local Bond Stress-Slip Relationship of a Deformed Bar Under Generalized Excitations," Report No. UCB/EERC 83/23. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Oct. 1983. 169 pp
- [6] Morita, S. and Kaku, T., 1984. "Slippage of Reinforcement in Beam-Column Joint of Reinforced Concrete Frame," Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, July 1984. pp. 477-484.
- [7] Alsiwat, J. M. and Saatcioglu, M., 1992. "Reinforcement Anchorage Slip under Monotonic Loading," Journal of Structural Engineering. ASCE, V. 118, No. 9, Sept. 1992. pp. 2421-2438.
- [8] Caltrans (2002), Caltrans Seismic Design Criteria, Version 1.3, California Department of Transportation, Sacramento, CA.
- [9] FEMA 356, 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, Nov. 2000
- [10] Vecchio, F. J. and Collins, M. P., 1986. "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI Journal. V. 83, No. 2, Mar. 1986. pp. 219-231.
- [11] Clough, R. W., (1966). "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements," Report 66 Structural and Materials Research, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.

- [12] Fukuda Y., "Study on the Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Buildings (in Japanese)." Proceedings, Kanto Branch Symposium, Architectural Institute of Japan, No.40 1969 pp 121-124
- [13] Imbeault FA, Nielsen NN. Effect of degrading stiffness on the response of multistory frames subjected to earthquakes. In: Proceedings, fifth world conference on earthquake engineering; 1973. p. 1756-65.
- [14] Takeda, T., Sozen, M. A., and Neilsen, N. N. 1970. "Reinforced concrete response to simulated earthquakes." *Journal of the Structural Division*. ASCE, V. 96, No. 12, Dec. 1970. pp. 2557-2573
- [15] Otani S. (1974) Inelastic analysis of R/C frame structures. ASCE J Struct Div 100(7): 1433–1449
- [16] Soleimani D., Popov EP.,Bertero VV. (1979) Nonlinear beam model for R/C frame analysis. In: Proceedings of 7th conference on electronic computation, St. Louis
- [17] Banon, H., Biggs, J. M., and Irvine, H. M., 1981. "Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames," *Journal of the Structural Division*. ASCE, V. 107, No. 9, Sep. 1981. pp. 1713-1729
- [18] Takayanagi, T. and Schnobricch, W. C., 1976. "Computed Behavior of Reinforced Concrete Coupled Shear Walls," Structural Research Series no. 434. Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, 1976
- [19] SAP2000. Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [20] Chowdary T. 2007. Hysteretic Modeling of Shear-Critical Reinforced Concrete Columns Master's Thesis The Ohio State University 217 pp.
- [21] Mander, J. B., Priestley, J. N., and Park, R., 1988. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*. ASCE, V. 114, No. 8, Aug. 1988. pp. 1804-1825.
- [22] Sezen, H., and Setzler, E. J. (2008). "Reinforcement slip in reinforced concrete columns." *ACI Struct. J.*, 105(3), 280–289.
- [23] Moehle, J. P., 1992. "Displacement-Based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes," *Earthquake Spectra*. EERI, V. 8, No. 3, Aug. 1992. pp. 403-428.
- [24] Setzler, E.J. Modeling the Behavior of Lightly Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Loads. M.S. Thesis. The Ohio State University, Columbus, Ohio, 2005.
- [25] Patwardhan, C., 2005. "Strength and Deformation Modeling of Reinforced Concrete Columns," M.S. Thesis. The Ohio State University, Columbus, Ohio, 2005. 166 pp.
- [26] Gerin, M. and Adebar, P., 2004. "Accounting for Shear in Seismic Analysis of Concrete Structures," Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, Aug. 2004. Paper No. 1747.
- [27] Elwood K.J., and Moehle J.P., "Evaluation of Existing Reinforced Concrete Columns," 13th World Conference on Earthquake Engineering, Aug, 2004, Paper No. 579
- [28] Pivot hysteretic Model.
http://docs.csiamerica.com/helpfiles/csibridge/Advanced_tab/Assign/Pivot_Hysteresis_Model.html
- [29] ATC-24 (1992) Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures. Applied Technology Council, California, A.B.D.